



## Modélisation de la fabrication directe de pièces par projection laser : application au Ti-6Al-4V

Arnaud Longuet, Christophe Colin, P. Peyre, Stéphane Quilici, Georges Cailletaud

### ► To cite this version:

Arnaud Longuet, Christophe Colin, P. Peyre, Stéphane Quilici, Georges Cailletaud. Modélisation de la fabrication directe de pièces par projection laser : application au Ti-6Al-4V. Matériaux 2006, 2006, Dijon, France. 11 p. hal-00144465

**HAL Id: hal-00144465**

**<https://hal.science/hal-00144465>**

Submitted on 3 May 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Modélisation de la fabrication directe de pièces par projection laser : application au Ti-6Al-4V

A. Longuet\*, C. Colin\*, P. Peyre\*\*, S. Quilici\*, G. Cailletaud\*

\* Centre des Matériaux, Mines Paris, Paristech, CNRS UMR 7633  
BP 87, 91003 Evry CEDEX, France

\*\* GIP-Gérailp, 16 bis avenue Prieur de la Côte d'Or, 94114 Arceuil CEDEX, France

---

**Abstract :** Direct metal laser deposition is an additive manufacturing process which allows a simple manufacturing of near net shape parts. This process develops a high temperature gradient during manufacturing which implies a heterogeneous microstructure and residual stresses. A good way to help process development is to undertake a numerical simulation, in order to predict the microstructure and residual stresses. A parametric study can then be performed to optimize the process.

**Key-words :** Direct metal laser deposition, finite element modeling, Ti-6Al-4V, residual stresses, thermal modeling

**Résumé :** La projection laser permet de fabriquer de façon relativement simple des pièces complexes, dont les dimensions sont proches des cotes finales. Le procédé s'accompagne néanmoins d'importantes variations locales de température, à l'origine d'une microstructure hétérogène, et de contraintes résiduelles difficiles à maîtriser. Une bonne manière d'aider au développement du procédé est de mettre en place sa simulation numérique, afin de prévoir la microstructure et les contraintes résiduelles. Des conditions laser adaptées et une stratégie de balayage optimisée doivent permettre d'obtenir la microstructure désirée et des contraintes résiduelles minimisées.

**Mots-clés :** Projection laser, modélisation éléments finis, Ti-6Al-4V, contraintes résiduelles, modèle thermique

---

## Introduction

Le sujet de cet article est l'étude du procédé de projection laser. Ce procédé est inspiré du rechargement laser, et permet de construire des pièces complexes, sans porosité, près des cotes, en utilisant des poudres métalliques. Il est bien adapté à la fabrication de pièces de grandes dimensions. La problématique soulevée par la modélisation de ce procédé n'est pas nouvelle, en effet les procédés de soudage ou de rechargement [Jendrzejewski et al., 2004], [Klingbeil et al., 2002] ont déjà été étudiés. Cependant la projection laser induit un cyclage thermique répété du matériau qui va avoir des conséquences sur sa microstructure, [Quian et al., 2005]. Des études ont été menées sur la thermique du procédé [Kelly, 2002], [Kelly and Kampe, 2004], [Griffith and Schlienger, 1999] mais peu d'études ont été réalisées sur la prédiction des contraintes et déformations résiduelles à l'issue de la fabrication directe d'une pièce. En revanche, l'interaction laser-poudre a été abordée par plusieurs auteurs [Lagrange, 1997], [Diniz Neto and Vilar, 2002] en essayant de modéliser au mieux les phénomènes physiques complexes mis en jeu.

Le but de la modélisation numérique est de prévoir la distribution des contraintes résiduelles et la microstructure des pièces projetées laser, de façon à apporter des éléments de réponse sur la stratégie de construction et le post-traitement thermique à entreprendre pour optimiser les propriétés mécaniques des démonstrateurs (pièces réelles démontrant la capacité du procédé). Aussi la modélisation doit permettre de réduire les expérimentations longues et coûteuses en passant d'une approche empirique à une approche plus quantitative des phénomènes mis en jeu. La connaissance de la température et de la déformation en tous points de la pièce au cours de sa fabrication constitue les données d'entrées pour l'évaluation de la microstructure et des contraintes résiduelles. Un point important à mettre en avant est le fait que la matière consolidée subit un chargement thermomécanique cyclique après avoir été portée bien au-delà de sa température de fusion. Aussi les données matériaux doivent être connues dans une très large gamme de température.

---

Le matériau mis en œuvre dans cette étude est le Ti-6Al-4V, qui présente des transformations de phases, fonction de la vitesse de refroidissement et des températures atteintes. Cette nuance d'alliage peut développer trois types de phases :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha'$ . La validation du modèle numérique est faite sur une géométrie relativement simple (mur) qui autorise une instrumentation fine, et permet de valider les données matériaux en température ainsi que la loi de comportement retenue. Le modèle thermomécanique du procédé a été développé à l'aide du logiciel ZéBulon qui est un code de calcul éléments finis co-développé par le Centre des Matériaux, l'ONERA et Northwest Numerics. Il permet de modéliser la thermique, la métallurgie et la mécanique dans le cadre d'un calcul couplé. De plus, ce code permet de réaliser des calculs parallèles utilisant une méthode de découpage en sous-domaines, qui s'avérera très utile lorsqu'il s'agira de transposer la procédure de calcul sur un démonstrateur de géométrie bien plus complexe qu'un mur. Le calcul doit pouvoir s'appuyer sur l'expérimentation pour recaler les données matériaux en thermique et en mécanique et adapter les conditions aux limites imposées. Les expérimentations envisagées sont essentiellement macroscopiques, et concernent d'une part la température des poudres venant alimenter le bain et d'autre part le rendement énergétique du procédé et la mesure de la température en certains points du substrat et du mur.

## Principe de fonctionnement

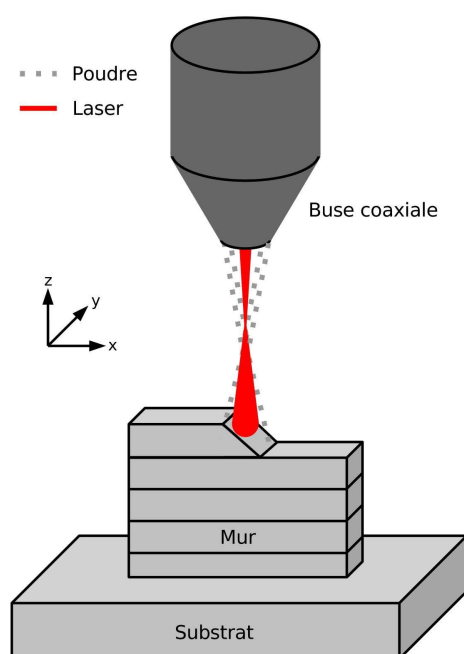


FIG. 1 – Principe de fonctionnement de la projection laser (cas d'un faisceau laser et d'un faisceau de poudre défocalisés)

La projection laser utilise un laser Nd : YAG d'une puissance maximale de 4 kW. Comme l'indique la figure 1, le faisceau laser va fondre au point d'impact le substrat métallique en Ti-6Al-4V, formant un bain liquide. En parallèle, la poudre est portée en température par le faisceau laser et est transportée par un gaz porteur (Hélium ou Argon) au travers d'une buse coaxiale jusqu'au bain liquide ainsi créé. La géométrie de la pièce est réalisée par le mouvement du substrat en X et Y et par le déplacement en Z de l'ensemble buse coaxiale et laser. La pièce est alors fabriquée couche par couche à partir des données CAO. Un gaz protecteur délivré par la buse est utilisé pour éviter l'oxydation de la pièce. Ainsi la construction du mur se fait par des allers et retours successifs de gauche à droite et à chaque point de rebroussement, la buse s'élève d'un certain  $\Delta z$  égal à la hauteur de couche apparente du mur. Ce procédé possède trois paramètres d'entrée, à savoir : la puissance laser  $P$ , la vitesse d'avance  $V$ , et le débit massique de poudre  $d_m$ . Il existe un domaine de paramétrie qui permet de construire dans les meilleures conditions des murs avec différentes microstructures [Maisonneuve and Colin, 2006]. Deux paramètres ( $P$ ,  $V$ ,  $d_m$ ) bien choisis donnant accès à une microstructure  $\alpha + \beta$ , l'une homogène et l'autre hétérogène, doivent permettre la mise au point du calcul et ainsi valider le modèle métallurgique.

## Mise en place du modèle numérique

Les phénomènes physiques mis en jeu dans ce procédé sont complexes et concernent trois domaines bien distincts : la thermique, la métallurgie et la mécanique. Ces trois domaines interagissent de manière plus ou moins forte. La figure 2 schématise les différents couplages qui existent entre ces trois domaines.

Le calcul a pour données d'entrée l'apport de chaleur et de matière relatifs aux trois paramètres  $P$ ,  $V$ ,  $d_m$ . Ces derniers vont influencer notamment sur la thermique et la géométrie du bain. Le volume du bain est fonction de  $d_m$ , de la température

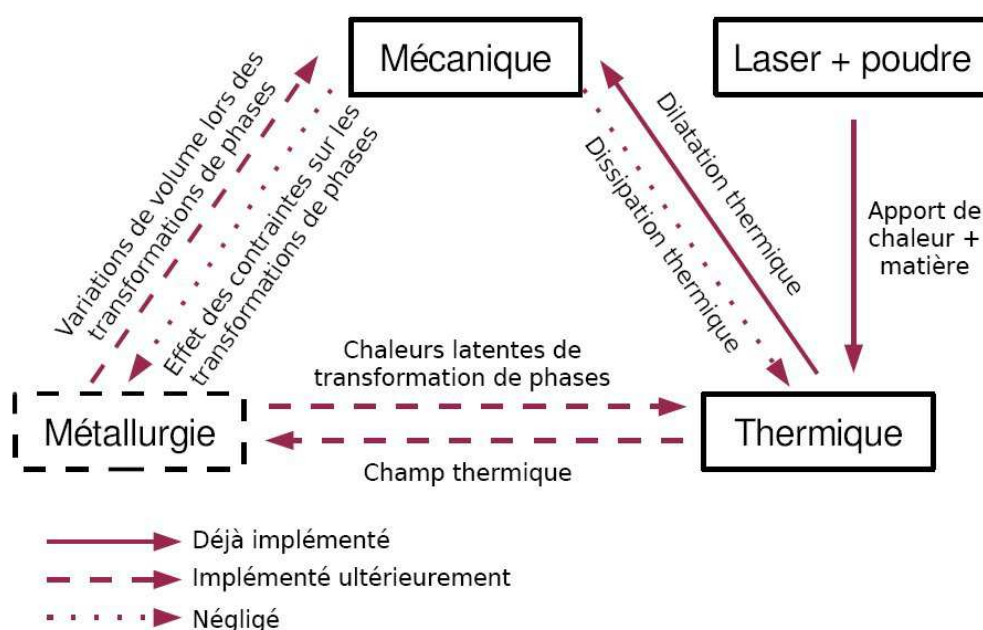


FIG. 2 – Phénomènes physiques intervenant dans le procédé de projection laser

et du ratio  $P/V$ , qui peuvent varier d'une couche à l'autre selon l'ampleur des différents modes de dissipation. Au début de la construction du mur, le refroidissement du bain se fait principalement par conduction [Maisonneuve et al., 2006]. Il y a également des pertes importantes en flux convectif et par rayonnement en surface du mur. Par ailleurs, la dissipation thermique due à la mécanique et les chaleurs latentes dues aux transformations de phases peuvent être négligées devant les flux de chaleur induits par le laser. La présence de gradients thermiques conduira au développement de contraintes au fur et à mesure que la limite d'élasticité du matériau va augmenter, rendant plus difficile l'écoulement viscoplastique.

Dans un premier temps, l'étude se limite à la prise en compte des interactions thermiques et mécaniques dans le cadre d'un calcul séquentiel. Des modèles de comportement plus fins prenant en compte les changements de phases sont en cours de mise au point.

## Modèle géométrique

### Maillage et apport de matière

L'ajout de matière au cours du temps est traité en réalisant préalablement un maillage complet de la pièce, à l'intérieur duquel les éléments sont activés peu à peu, rendant ainsi compte de l'arrivée de la poudre avec un intervalle de temps régulier,  $\Delta t$ . Celui-ci dépend de la vitesse d'avance  $V$  et du diamètre du faisceau laser  $\phi_l$ , supposé égal à l'épaisseur du mur. Le volume total d'éléments activés,  $V_{app}$ , est alors proportionnel au débit volumique de poudre,  $d_v$ , au rendement massique du procédé,  $R_m$  (dans le cas présent 80%), et à l'incrément de temps  $\Delta t$ . Le maillage est donc dépendant de la vitesse d'avance  $V$ , du débit volumique de poudre  $d_v$ , du rendement massique  $R_m$  et du diamètre du faisceau laser  $\phi_l$ .

L'activation des éléments s'opère à l'aide d'une variable d'état  $z$  définie aux points de Gauss. La valeur  $z=0$ , représente le milieu inactif, tandis que  $z=1$  indique la présence du Ti-6Al-4V. Les conditions aux limites sont variables dans le temps de manière à suivre le front d'apparition de la matière. Une petite application développée en langage de commande permet de spécifier le nombre d'élément par couche, le nombre d'élément dans l'épaisseur du mur, et le nombre d'élément

se trouvant sous le faisceau laser. Cette procédure va permettre d'entreprendre des calculs réalistes capables d'accepter des gradients thermiques élevés dans le mur. Ces calculs restent à une échelle "macroscopique", en s'appuyant sur la thermique globale du mur. En raison de la taille des éléments, on ne représente pas la forme réelle du bain liquide, ni les phénomènes physiques associés (convection de Marangoni ...).

Le maillage comporte 50000 éléments avec 3 éléments par couche, 3 dans l'épaisseur et 2 sous le faisceau laser. La longueur du mur est de 30 mm, son épaisseur de 1,5 mm, et la hauteur par couche de  $400\ \mu\text{m}$ , soit une hauteur totale de 20 mm. Le mur repose sur un substrat en Ti-6Al-4V de 8 mm d'épaisseur pour 12 mm de large et 40 mm de long. En raison de la symétrie du procédé, on considère seulement la demi-épaisseur du mur (voir figure 3).

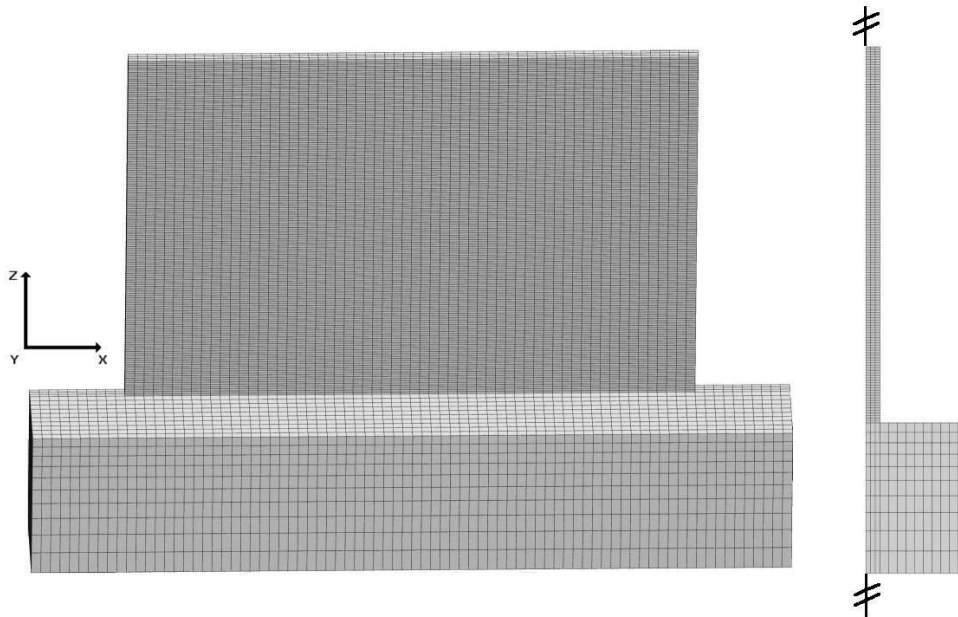


FIG. 3 – Maillage d'un demi-mur reposant sur le substrat

L'activation des éléments se fait bloc par bloc, un bloc étant constitué de 3 éléments dans la hauteur et 3 dans l'épaisseur. Un second bloc d'éléments est activé sous le faisceau laser, et son déplacement se fait bloc par bloc de façon à conserver deux blocs d'éléments sous le faisceau laser, soit une surface de  $1,5\ \text{mm}^2$ , à comparer avec la surface éclairée par le faisceau laser, qui est de  $1,8\ \text{mm}^2$ . On arrive ainsi à une description relativement continue du problème. En outre, deux blocs d'éléments sont activés au moment du changement de couche. Afin d'être cohérent vis-à-vis du procédé, il sera ultérieurement judicieux d'introduire des temporisations entre chaque couche.

## Modèle thermique

Les températures sont calculées aux nœuds en résolvant l'équation de la chaleur via la méthode des éléments finis. Le code utilise une intégration implicite. Les éléments sont des tétraèdres à 8 nœuds et 8 points de Gauss.

Les blocs d'éléments apparaissent à une température supérieure à l'ambiante, car les auteurs s'accordent à indiquer que la poudre est chauffée avant d'arriver dans le bain liquide par l'interaction entre le faisceau laser et la poudre [Diniz Neto and Vilar, 2002]. Un calcul de cette température  $T_{app}$  basé sur l'article précédemment cité donne une température d'apparition des éléments de  $1200\ ^\circ\text{C}$  en moyenne. Il faut donc imposer une température  $T_{app}$  à tous les éléments inactifs pour que, lors de leur activation, ils représentent bien la poudre qui arrive dans le bain liquide. Le substrat a quant

à lui une température initiale égale à la température ambiante  $T_{amb}$ .

Plusieurs conditions aux limites sont appliquées sur les éléments suivant leur environnement immédiat. Il s'agit soit d'une condition de convection, d'une condition de rayonnement ou d'une condition de flux imposée. L'apport de chaleur dû au laser est modélisé par un flux surfacique  $q_{laser}$  appliqué sur les deux derniers blocs d'éléments activés. Bien que la densité de puissance soit souvent modélisée par une gaussienne dans le cas d'un faisceau défocalisé, le faible nombre d'éléments sous le faisceau laser (six éléments) ne permet pas de représenter correctement celle-ci. La densité de puissance appliquée s'écrira :

$$q_{laser} = \frac{P \cdot \eta - P_{poudre}}{S_{flux}} \quad \text{avec} \quad P_{poudre} = R_m \cdot d_m \cdot C_p(T) \cdot (T_{app} - T_{amb}) \quad (1)$$

avec  $\eta$  le rendement du procédé,  $P_{poudre}$  la puissance dissipée par la poudre,  $S_{flux}$  la surface sur laquelle est appliqué le flux et  $C_p(T)$  la capacité calorifique du Ti-6Al-4V. Les propriétés thermophysiques des éléments inactifs ont été choisies de manière à ce qu'ils n'interviennent pas dans le calcul. Il suffit pour cela de choisir une conductivité thermique négligeable ( $0,01 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

Pour modéliser l'échange d'énergie avec le milieu extérieur, deux conditions aux limites sont appliquées : une condition de convection avec un coefficient d'échange,  $h(T)$ , variable en fonction de la température, et une condition de rayonnement avec une émissivité totale  $\varepsilon_t = 70\%$ . Ces conditions aux limites sont appliquées sur toute la surface extérieure de la pièce. Elles s'expriment de la façon suivante :

$$\begin{cases} q_{conv} = h(T) \cdot (T - T_{ext}) & \text{avec } h(T) \text{ variant de } 20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} \text{ à } 150 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} \\ q_{ray} = \sigma \cdot \varepsilon_t \cdot (T^4 - T_{ext}^4) & \text{avec } T \text{ en Kelvin et } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4} \end{cases} \quad (2)$$

$T_{ext}$  est la température du milieu extérieur, ici la température ambiante. La variation du coefficient d'échange avec la température ne vise pas à modéliser directement la relation température-convection mais plutôt à rendre compte de la convection forcée due au gaz porteur et protecteur proche du bain liquide (là où les températures sont les plus élevées). Les propriétés thermophysiques du Ti-6Al-4V ont été choisies à partir des données de la littérature. Dans la mesure où les données disponibles sont rares pour des températures supérieures à  $1000^\circ\text{C}$ , certaines valeurs sont extrapolées. Le tableau I récapitule les principales données nécessaires au calcul.

Symbole	Signification	Valeur
$P$	Puissance laser	300 W
$V$	Vitesse de balayage	300 mm/min
$d_m$	Débit massique de poudre	1 g/min
$\rho$	Masse volumique	4,42 g/cm <sup>3</sup>
$d_v = d_m/\rho$	Débit volumique de poudre	3,8 mm <sup>3</sup> /s
$\phi_l$	Diamètre du faisceau laser	1,5 mm
$\Delta t = \phi_l/V$	Incrément de temps	0,3 s
$e_{app}$	Epaisseur apparente du mur	1,5 mm
$H_{app} = \Delta z$	Hauteur apparente des couches (incrément de montée en Z)	0,4 mm
$R_m$	Rendement massique du procédé	80 %
$V_{app}$	Volume de matière apportée	0,9 mm <sup>3</sup>
$S_{flux}$	Surface sur laquelle est appliquée le flux	1,5 mm <sup>2</sup>
$S_{laser} = \pi \cdot \phi_l^2 / 4$	Surface éclairée par le laser	1,8 mm <sup>2</sup>
$T_{app}$	Température d'apparition des éléments	1200 °C
$T_{amb}$	Température ambiante	25 °C
$\eta$	Rendement énergétique du procédé	33 %
$C_p$	Capacité calorifique à 25 °C	610 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$P_{poudre} = R_m \cdot d_m \cdot C_p \cdot (T_{app} - T_{amb})$	Puissance dissipée par la poudre	9,5 W
$q_{laser} = (P \cdot \eta - P_{poudre}) / S_{flux}$	Densité de puissance laser	6.10 <sup>7</sup> W/m <sup>2</sup>
$\epsilon_t$	Emissivité totale du matériau massif	70 %

Tab. I - Principales données nécessaires au calcul

## Modèle mécanique

Les phénomènes physiques pris en compte amènent à considérer un couplage faible entre la thermique et la mécanique. En effet, la température étant la donnée d'entrée du calcul mécanique, la principale source des déformations est la dilatation thermique, qui s'exprime comme suit en fonction du coefficient de dilatation linéaire  $\alpha(T)$  :

$$\epsilon_{th} = \alpha(T) \cdot (T - T_{ref}) - \alpha(T_{ini}) (T_{ini} - T_{ref}) \quad (3)$$

avec  $T_{ref}$  la température à partir de laquelle est mesuré  $\alpha$  et  $T_{ini}$  la température initiale

Le calcul des contraintes et des déformations dans la pièce lors de sa construction se fait via une méthode éléments finis en déplacement. Les éléments utilisés sont les mêmes que dans le calcul thermique, ce qui permet d'utiliser directement les valeurs de température calculées aux nœuds. La gestion des éléments inactifs est basée sur le même principe que pour le calcul thermique. On leur assigne des propriétés mécaniques faibles : le module d'Young est pris à 0,1 MPa, ce qui produit une contrainte négligeable.

La condition de symétrie est assurée par le blocage des nœuds du plan de symétrie selon l'axe  $\vec{y}$ . Le bridage du substrat sur la table XY est assuré par une condition de déplacement nul selon  $\vec{z}$ . Le nœud situé à l'origine du repère cartésien est bloqué en déplacement dans les trois directions de façon à éviter tout mouvement de corps rigide.

Un modèle de comportement élasto-visco-plastique ne tenant pas compte pour le moment des changements de phases a été élaboré pour le Ti-6Al-4V à partir d'essais mécaniques réalisés entre 20 °C et 750 °C. Les variables utilisées dans ce modèle sont des fonctions de la température. Au dessus de 1000 °C les propriétés mécaniques du Ti-6Al-4V sont extrapolées en tenant compte de la perte rapide des propriétés mécaniques.

## Résultats et discussion

Tout d'abord la discussion portera sur les résultats de thermique. La figure 4 montre le bain liquide au cours de la fabrication du mur de 50 couches. La construction est arrêtée au cours du dépôt de la 42<sup>e</sup>. Le laser est alors situé au milieu du mur selon la direction  $\vec{x}$ . La température dans le bain liquide varie entre 2480 °C et 1660 °C. La température moyenne se situe aux alentours de 2000 °C. Cette figure montre qu'en dessous du bain liquide, le gradient thermique est fort. Ceci est dû au fait que la conductivité thermique du Ti-6Al-4V est faible ( $\lambda = 5,8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ). Le régime de conduction dans la pièce reste la première cause de refroidissement du bain liquide, mais par rapport à d'autres matériaux comme le X10Cr13 ou le Stellite SF6 [Jendrzewski et al., 2004], le rayonnement et surtout la convection jouent un rôle non négligeable. Cependant, le bain liquide a une température de 340 °C supérieure à la température de fusion du Ti-6Al-4V, ce qui n'est pas le cas pour les matériaux précédemment cités. Les isothermes autour du bain liquide mettent en évidence la "traînée" du champ thermique en arrière du laser, qui se déplace ici vers la droite.

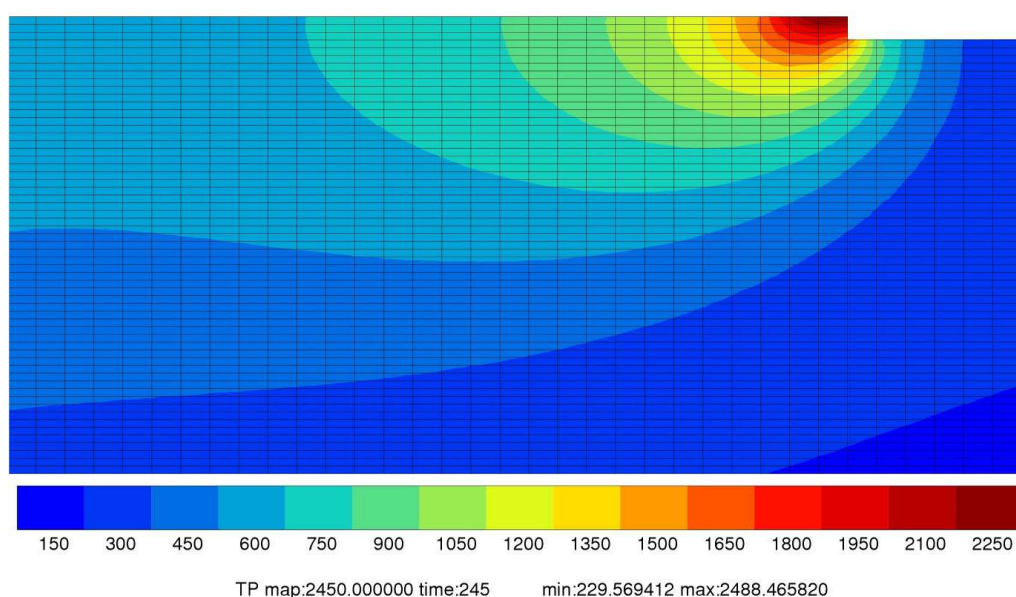


FIG. 4 – Cartographie des températures autour du bain liquide (seules les 22 dernières couches déposées sur 42 sont représentées)

Le gradient thermique (voir figure 5) à la verticale du bain liquide permet de recalculer les températures dans celui-ci. Les mesures de températures proches du bain liquide étant très délicates, un moyen de vérification consiste à observer la microstructure d'un mur arrêté en cours de fabrication [Maisonneuve et al., 2006]. Il existe trois zones distinctes proches du bain liquide dont on peut mesurer la taille. La première concerne l'épaisseur de couche apparente  $H_{app}$ , qui fait partie des données imposées dans le calcul. Ensuite, il y a la zone refondue  $H_{ZR}$  qui mesure un peu moins d'une couche. Enfin, la dernière zone correspond à la hauteur de la zone affectée thermiquement  $H_{ZAT}$  qui est portée, lors de la fabrication, à des températures au-dessus du transus  $\beta$  du Ti-6Al-4V. Celui-ci n'est pas connu exactement aux vitesses de refroidissement considérées. La transition  $\beta \rightarrow \alpha$  s'effectue à 980 °C pour des vitesses de refroidissement classiques, et est supposée se situer aux environs de 1100 °C [Robert et al., 2006] pour des vitesses de refroidissement de l'ordre de 1000 °C/s comparables à celles mesurées dans le procédé.

On constate que, sur la zone refondue, l'accord entre le calcul et l'expérience est assez probant. L'avant dernière couche déposée est à demi refondue. Par contre, la zone affectée thermiquement (zone chauffée au-delà de  $T_\beta = 1100$  °C) ne concerne que 2 couches au lieu de 6. Ceci est probablement causé par un coefficient de convection trop élevé aux hautes températures. Contrairement à ce qu'indique J. Maisonneuve, la ZAT s'étend bien en-deçà de 1100 °C et en l'oc-



curence jusqu'à la température de recuit,  $T_0$ . Aussi la formation d'une seconde ZAT entre  $T_\beta$  et  $T_0$  est à envisager.

Par ailleurs, le calcul indique que plus on se rapproche du substrat, plus la température diminue. Elle est constante sur la moitié basse du mur au bout de la 42<sup>e</sup> couche déposée. Celle-ci se situe aux alentours de 300 °C et constitue la température de recuit,  $T_0$ , que J. Maisonneuve a estimée à environ 600 °C par pyrométrie laser. Les 300 °C correspondent plutôt à la température de la cinquième couche au moment où l'on construit la cinquantième couche [Maisonneuve et al., 2006]. Cette différence pourrait être causée par une différence d'épaisseur du substrat entre le calcul et l'expérience.

Cela est confirmé par les courbes de la figure 6 qui met en évidence qu'il n'y a plus de cyclage thermique au bout de 20 couches, conformément aux mesures expérimentales. Cette figure montre deux phases : la première où la température pic du bain liquide augmente avec le temps et la deuxième où celle-ci devient stationnaire (de même pour la température de recuit). Cela suggère l'établissement d'un régime stationnaire à partir d'un certain moment dans le mur. En ce qui concerne le cyclage thermique, on peut comparer les vitesses de refroidissement en haut du pic de la dixième couche avec celle mesurée par le pyromètre laser [Maisonneuve et al., 2006]. Le calcul trouve 2000 °C/s, à comparer au 1000 °C/s mesurés. Le refroidissement est donc suffisamment rapide pour obtenir une microstructure trempée. Il peut en être fait de même pour les vitesses de refroidissement au pied du pic. Le calcul donne 40 °C/s, alors que le pyromètre mesure 30 °C/s.

Ces premiers résultats, qui demandent à être raffinés, sont tout a fait encourageants. En effet si le refroidissement simulé est trop rapide aux hautes températures par rapport aux expériences réalisées, on constate que le calcul thermique donne les bons sens de variation et rend bien compte qualitativement des phénomènes physiques mis en jeu.

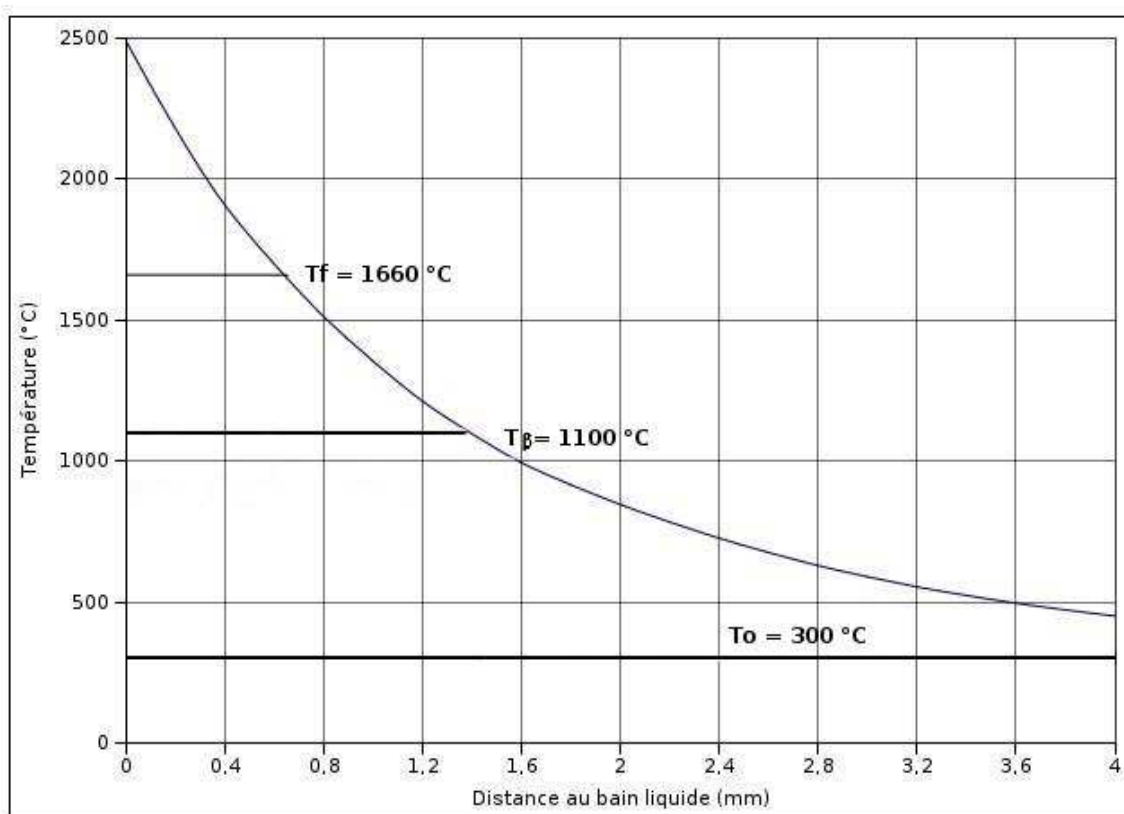


FIG. 5 – Température en fonction de l'ordonnée dans le bain liquide (chaque graduation en abscisse représente une couche)

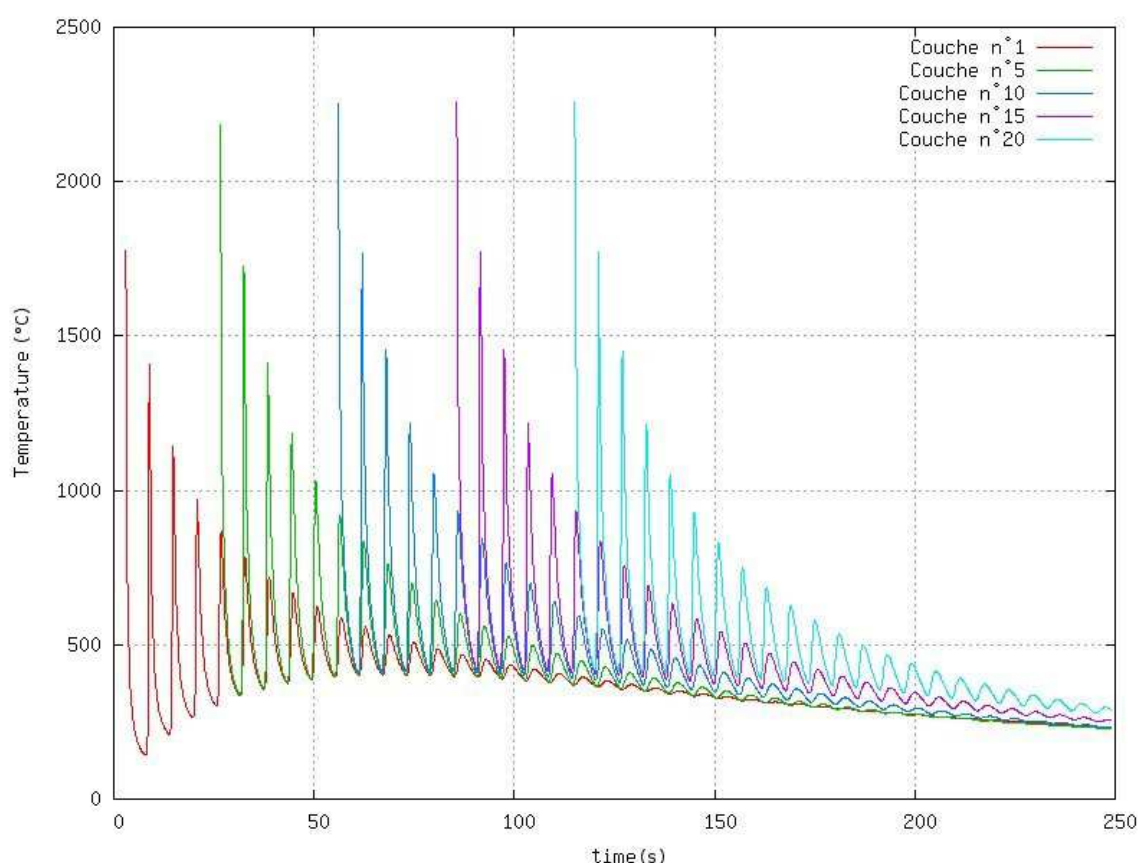


FIG. 6 – Température d'une couche donnée en fonction du temps

La figure 7 montre le mur en cours de construction, la partie à forte contrainte en haut du mur correspond à l'emplacement du laser. Les contraintes de von Mises maximales sont de l'ordre de 850 MPa dans le bain liquide pour une température de l'ordre de 2480 °C. La limite d'élasticité conventionnelle est de l'ordre de 800–900 MPa à 25 °C, donc lors de la construction de la pièce, le matériau présente un écoulement viscoplastique à très haute température mais se plastifie relativement peu aux températures intermédiaires et à l'ambiante.

La largeur du mur est plus importante à sa base qu'à son extrémité supérieure. C'est simplement le résultat de conditions cinématiques d'encastrement, qui obligent les déplacements de la matière située à la base, à rester compatibles avec ceux du support. Au cours du processus de dépôt, la température commence par augmenter de  $T_{app}$  à  $T_{pic}$ , à des niveaux tels qu'il y a un écoulement viscoplastique permettant au matériau de "suivre le support". Les contraintes et les déformations résiduelles se construisent au refroidissement, à partir du moment où le matériau "résiste" suffisamment. Elles sont donc le résultat de la compétition entre la dilatation thermique et l'écoulement plastique : si le coefficient de dilatation thermique est important et que l'écart de température est grand, on aura tendance à accentuer ces phénomènes. Si, partant de la température  $T_{pic}$ , la limite d'élasticité reste faible jusqu'à des températures relativement basses, on privilégiera l'écoulement viscoplastique, donc les déformations de la pièce. Si au contraire le matériau se "consolide" pour les températures élevées, la pièce se déformera moins, mais sera le siège de contraintes importantes.

Dans le cas du mur, près du substrat, la matière travaille à déplacement imposé par le support. Elle se déformera peu et les niveaux de contrainte seront élevés. Le retrait thermique est plus libre lorsque l'on va vers le sommet, si bien que la pièce finale sera plus étroite à cet endroit et les contraintes moins élevées. Ce phénomène est confirmé par l'expérience. Lorsque l'on fabrique un mur en utilisant une puissance un peu basse par rapport aux autres paramètres, il n'y a pas

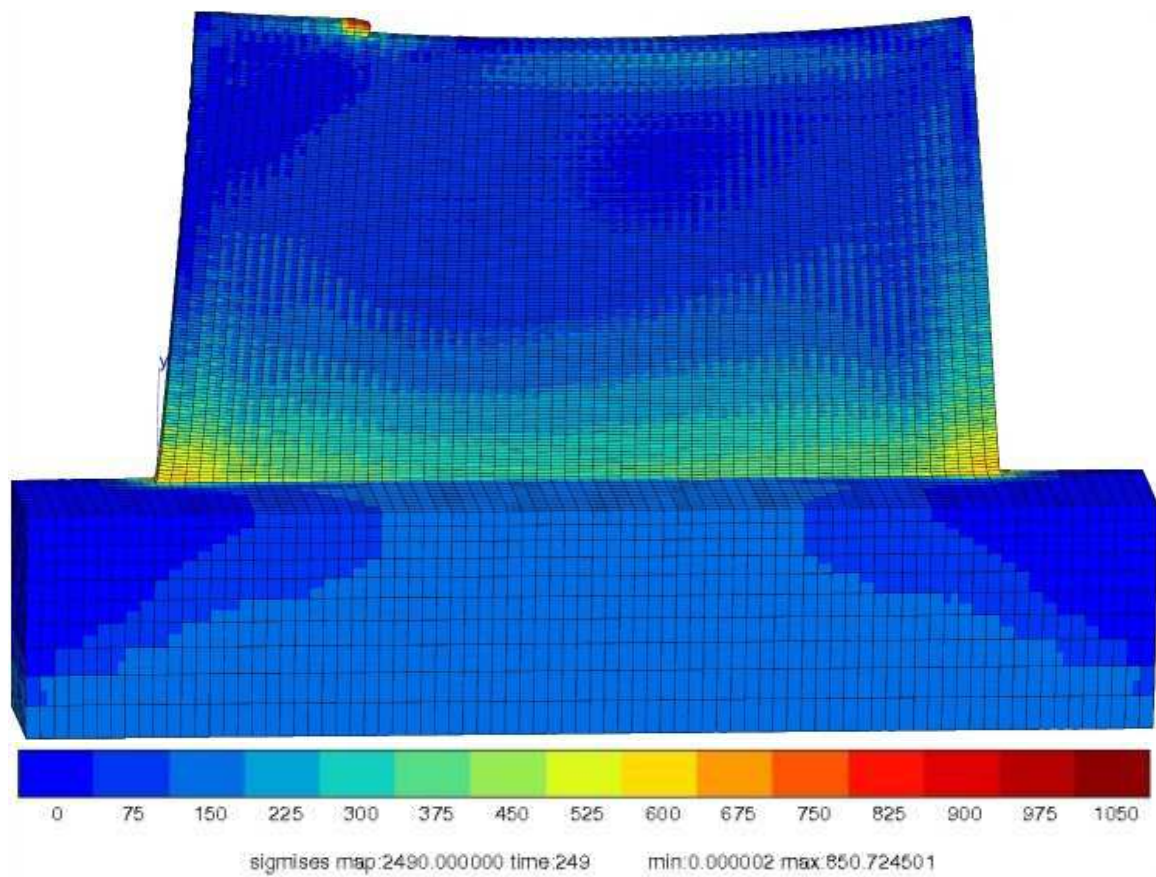


FIG. 7 – Cartographie de la contrainte de von Mises dans le mur au cours de la fabrication (maillage déformé x3)

suffisamment de puissance pour bien fondre le substrat, mais le mur se contruit quand même. Dans ces conditions, le mur a tendance à se détacher des deux côtés.

## Conclusion

Une modélisation du procédé de projection laser est en cours de développement. Dans l'étape actuelle, les champs thermiques sont correctement reproduits. Quelques facteurs comme le coefficient de convection et le flux appliqué sont à ajuster pour que le refroidissement soit plus lent. Le recalage complet du modèle sera réalisé en utilisant des mesures de température par thermocouple, près et loin du substrat. Il sera judicieux de regarder les vitesses de refroidissement lorsque l'on fait varier la température initiale du substrat en vue d'obtenir des microstructures différentes. De même le modèle mécanique montre le retrait de la matière. Les déformations correspondent bien à ce qui est observé lors de la fabrication du mur. Un modèle prenant en compte la métallurgie doit être élaboré, et des vérifications sur les déformations résiduelles doivent être faites. En conclusion, le modèle nécessite une mise au point de ses paramètres pour que les valeurs numériques soient correctement calibrées, mais il rend d'ores et déjà compte des phénomènes physiques accompagnant la projection laser.

## Remerciement

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet PROFIL financé par l'ANR qui traite de l'étude de deux procédés de fabrication : la projection et le frittage laser. Les partenaires industriels de ce projet font partie du GIFAS : Dassault Aviation, MBDA, Eurocopter, SNECMA, EADS-CCR. L'Ecole des Mines de Paris ainsi que le GIP/Gérailp sont les deux laboratoires de soutien impliqués dans cette étude.

## Références

- [Diniz Neto and Vilar, 2002] Diniz Neto, O. and Vilar, R. (2002). Physical-computational model to describe the interaction between a laser beam and a powder jet in laser surface processing. *Journal of Laser Applications*, 14 :46–51.
- [Griffith and Schlienger, 1999] Griffith, M. and Schlienger, M. (1999). Understanding thermal behavior in the LENS process. *Materials and Design*, 20 :107–113.
- [Jendrzejewski et al., 2004] Jendrzejewski, R., Sliwinski, G., Krawczuk, M., and Ostachowicz, W. (2004). Temperature and stress fields induced during laser cladding. *Computers and Structures*, 82 :653–658.
- [Kelly, 2002] Kelly, S. (2002). Characterization and thermal modeling of laser formed Ti-6Al-4V, master thesis.
- [Kelly and Kampe, 2004] Kelly, S. and Kampe, S. (2004). Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti-6Al-4V builds : Thermal modeling. *Metallurgical and Materials Transactions*, 35A :1869–1879.
- [Klingbeil et al., 2002] Klingbeil, N., Beuth, J., Chin, R., and Amon, C. (2002). Residual stress-induced warping in direct metal solid freeform fabrication. *Int. J. Mech. Sci.*, 44 :57–77.
- [Lagrange, 1997] Lagrange, L. (1997). *Caractérisation microstructurale et tribologique de revêtements composites à matrice métallique élaborés sous faisceau laser par projection coaxiale de poudre*. PhD thesis, INPL, Nancy.
- [Maisonneuve and Colin, 2006] Maisonneuve, J. and Colin, C. (2006). Direct manufacturing of aeronautical components by laser metal deposition of Ti-6Al-4V. In *ICALEO*, Scottsdale, USA.
- [Maisonneuve et al., 2006] Maisonneuve, J., Colin, C., Bienvenu, Y., and Aubry, P. (2006). Etude des phénomènes thermiques associés à la fabrication directe de pièces en TA6V par projection laser. In *Matériaux 2006*, Dijon, France.
- [Quian et al., 2005] Quian, L., Mei, J., Liang, J., and Wu, X. (2005). Influence of position and laser power on thermal history and microstructure of direct laser fabricated Ti-6Al-4V samples. 21 :597–605.
- [Robert et al., 2006] Robert, Y., Mariage, J.-F., Cailletaud, G., and Aebly-Gautier, E. (2006). Modélisation numérique du procédé de soudage par laser YAG impulsif d'un alliage de titane (TA6V). In *Matériaux 2006*, Dijon, France.